

УДК 621.317

**О. О. Семенова, к. т. н.; А. О. Семенов, к. т. н.; В. К. Задорожний, к. т. н., доц.;  
О. О. Войцеховська**

## **ЕЛЕМЕНТИ ФАЗИ-ЛОГІКИ ТИПУ ”ДОБУТОК”**

*У статті розроблені рівняння роботи частотно-імпульсних, широтно-імпульсних і фазо-імпульсних елементів, що реалізують фазі-логічні операції типу “добуток” – “І”, “АБО”, “СУМА”, які є окремим випадком логічних операцій “мінімум”, “максимум” та “виключне АБО” відповідно. Описано функціонування елементів фазі-логіки типу “добуток”. Наведено часові діаграми роботи частотно-імпульсного елемента “І”, широтно-імпульсного елемента “АБО” і фазо-імпульсного елемента “СУМА”. Розроблено структурну схему частотно-імпульсного елемента “І”.*

**Ключові слова:** імпульсний сигнал, логічний елемент, фазі-логіка.

### **Вступ**

Пристрої автоматичного керування, які функціонують на основі фазі-логіки знаходять своє застосування у складних телекомунікаційних, радіотехнічних та мікроелектронних системах, вхідні дані яких зазнають постійних змін, а вихідні потребують регулювання у масштабі реального часу. Саме застосування спеціалізованих пристроїв автоматичного керування, що функціонують на основі фазі-логіки, замість традиційних пристроїв керування дозволяє підвищити точність та надійність керування. В окремих випадках у пристроях автоматичного керування, що функціонують на основі фазі-логіки, логічний висновок здійснюється за допомогою логічних операцій типу “добуток” – “І”, “АБО”, “СУМА”, які є окремим випадком логічних операцій “мінімум”, “максимум” та “виключне АБО” відповідно [1].

Для подальшого проектування пристроїв автоматичного керування потрібно синтезувати елементи, які здійснюють операції фазі-логіки типу “добуток”; а для синтезу вказаних елементів необхідно розробити їх математичні моделі. Математичні моделі елементів фазі-логіки розроблено у [2 – 4], але тут не враховується вид інформаційного сигналу. У літературі [3 – 5] наведені схеми фазі-логічних елементів, у яких вхідна та вихідна інформація представлені аналоговими сигналами змінної напруги або змінного струму, що зумовлює їх низьку точність. В той же час, використання цифрових сигналів призводить до зниження швидкодії пристроїв.

Підвищити точність систем, які функціонують на основі фазі логіки, пропонується за рахунок застосування не аналогових, а імпульсних сигналів, оскільки кодування значень фазі-логічних величин параметрами імпульсів, враховуючи можливі похибки і завади, дозволить досягнути більшої точності, ніж формування аналогових сигналів, форма яких відповідає формі функцій належності, так як сформувати сигнал, форма якого є математично ідеальною, майже неможливо.

У зв'язку з цим метою даної роботи є підвищення ефективності проектування елементів фазі-логіки.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі:

- розробити методи кодування фазі-логічних величин параметрами імпульсів сигналу;
- визначити основні операції фазі-логіки типу «добуток»;
- розробити рівняння роботи елементів фазі-логіки типу «добуток».

### Імпульсне кодування фазі-величин

На попередньому етапі розробки елементів, які функціонують за правилами фазі-логіки, необхідно спочатку визначити спосіб представлення фазі-величин за допомогою параметрів сигналів таких пристроїв. Оскільки надалі будуть розроблятися елементи, сигнали у яких є імпульсними, потрібно визначити спосіб кодування фазі-величин параметрами імпульсно-модульованих сигналів. У даному випадку імпульсними називаються частотно-, широтно- і фазо-імпульсні сигнали. Авторами розроблено методи імпульсного кодування фазі-величин  $\mu$ . Їх наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Імпульсне кодування фазі-величин

Тип кодування	Фазі-логічний нуль	Фазі-логічна одиниця	Допоміжна величина	Додаткові умови	Кодування фазі-величини
Частотно-імпульсне	$f_\alpha$	$f_\beta$	$f_\gamma$	$f_\beta > f_\alpha$ , $f_\gamma = f_\beta - f_\alpha$	$f_\mu = f_\alpha + \mu \cdot f_\gamma$
Широтно-імпульсне	$t_\alpha$	$t_\beta$	$t_\beta^n$ , $t_\alpha^n$	$t_\beta > t_\alpha$ , $t_\beta^n < t_\alpha^n$	$t_\mu = \mu \cdot t_\beta + (1 - \mu) \cdot t_\alpha$
Фазо-імпульсне	$\varphi_\alpha$	$\varphi_\beta$	$f_1^x$	$\varphi_\alpha = 0$ , $\varphi_\beta = 2\pi$	$\varphi_\mu = \mu \cdot 2\pi$

При частотно-імпульсному кодуванні вхідні і вихідні сигнали пристроїв представляють собою імпульси, частота заповнення яких  $f_\mu$  пропорційна значенню фазі-величини  $\mu$ . У даному методі кодування нульовому значенню фазі-величини відповідає частота заповнення імпульсів  $f_\alpha$ , а одиничному –  $f_\beta$ ; частотний діапазон, у якому знаходяться значення фазі-величини від 0 до 1, визначається за допомогою частоти заповнення імпульсів  $f_\gamma$ .

При широтно-імпульсному кодуванні значенню фазі-величини  $\mu$  відповідає тривалість імпульсу  $t_\mu$ . Тривалість імпульсу  $t_\alpha$  відповідає нульовому значенню фазі-величини, а  $t_\beta$  – одиничному.

При фазо-імпульсному кодуванні значенню фазі-величини  $\mu$  відповідає різниця фаз вхідного і опорного імпульсів  $\varphi_\mu$ . Різниця фаз вхідного і опорного сигналів  $\varphi_\alpha = 0$  відповідає нульовому значенню функції належності, а різниця фаз вхідного і опорного сигналів  $\varphi_\beta = 2\pi$  – одиничному.

### Операції фазі-логіки типу "добуток"

Математично операції фазі-логіки типу "добуток" можна представити таким чином [3]:

$$\mu_{AND}^y = \mu_1^x \cdot \mu_2^x, \quad (1)$$

$$\mu_{OR}^y = \mu_1^x + \mu_2^x - \mu_1^x \cdot \mu_2^x, \quad (2)$$

$$\mu_{SUM}^y = \mu_1^x + \mu_2^x - 2 \cdot \mu_1^x \cdot \mu_2^x. \quad (3)$$

Запропоновані рівняння роботи частотно-імпульсних, широтно-імпульсних і фазо-імпульсних елементів, які реалізують операції "І", "АБО", "СУМА", наведені у табл. 2.

Таблиця 2

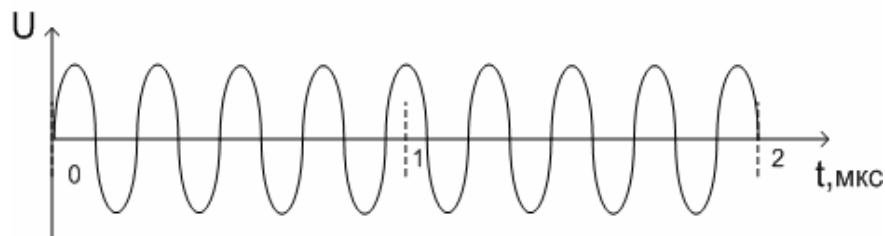
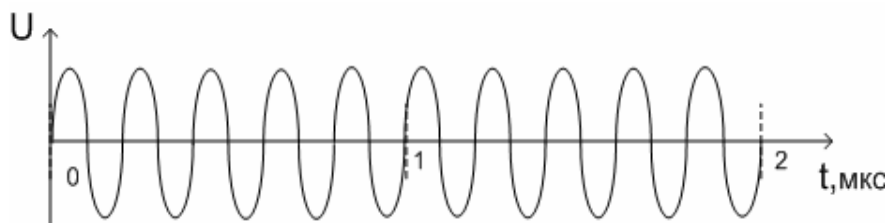
## Рівняння роботи елементів фазі-логіки типу "добуток"

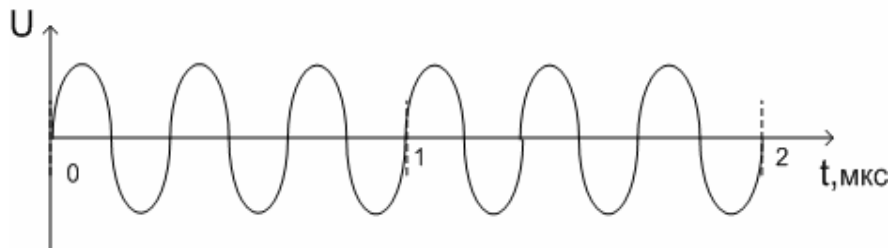
	Частотно-імпульсний елемент	Широтно-імпульсний елемент	Фазо-імпульсний елемент
Вхідні величини	$f_1^x = f_\alpha + \mu_1^x \cdot f_\gamma,$ $f_2^x = f_\alpha + \mu_2^x \cdot f_\gamma$	$t_1^x = \mu_1^x \cdot t_\beta + (1 - \mu_1^x) \cdot t_\alpha, f_2^x$	$\varphi_1^x = \mu_1^x \cdot 2\pi,$ $\varphi_2^x = \mu_2^x \cdot 2\pi$
Результат логічної операції І	$f_{AND}^y = f_\alpha + \mu_{AND}^y \cdot f_\gamma =$ $= f_\alpha + (\mu_1^x \cdot \mu_2^x) f_\gamma$	$t_{AND}^y = \mu_{AND}^y \cdot t_\beta +$ $+(1 - \mu_{AND}^y) \cdot t_\alpha =$ $= \mu_1^x \cdot \mu_2^x \cdot t_\beta +$ $+(1 - \mu_1^x \cdot \mu_2^x) \cdot t_\alpha$	$\varphi_{AND}^y = \mu_{AND}^y \cdot 2\pi =$ $= \mu_1^x \cdot \mu_2^x \cdot 2\pi$
Результат логічної операції АБО	$f_{OR}^y = f_\alpha + \mu_{OR}^y \cdot f_\gamma =$ $= f_\alpha +$ $+(\mu_1^x + \mu_2^x - \mu_1^x \cdot \mu_2^x) f_\gamma$	$t_{OR}^y = \mu_{OR}^y \cdot t_\beta + (1 - \mu_{OR}^y) \cdot t_\alpha =$ $= (\mu_1^x + \mu_2^x - \mu_1^x \mu_2^x) t_\beta +$ $+ [1 - (\mu_1^x + \mu_2^x - \mu_1^x \mu_2^x)] t_\alpha$	$\varphi_{OR}^y = \mu_{OR}^y \cdot 2\pi =$ $= (\mu_1^x + \mu_2^x - \mu_1^x \mu_2^x) \times$ $\times 2\pi$
Результат логічної операції СУМА	$f_{SUM}^y = f_\alpha + \mu_{SUM}^y \cdot f_\gamma =$ $= f_\alpha +$ $+(\mu_1^x + \mu_2^x - 2\mu_1^x \mu_2^x) f_\gamma$	$t_{SUM}^y = \mu_{SUM}^y \cdot t_\beta +$ $+(1 - \mu_{SUM}^y) \cdot t_\alpha =$ $= (\mu_1^x + \mu_2^x - 2\mu_1^x \mu_2^x) t_\beta +$ $+ [1 - (\mu_1^x + \mu_2^x - 2\mu_1^x \mu_2^x)] t_\alpha$	$\varphi_{SUM}^y = \mu_{SUM}^y \cdot 2\pi =$ $= (\mu_1^x + \mu_2^x - 2\mu_1^x \mu_2^x) \times$ $\times 2\pi$

Запропоновані рівняння роботи можна використати у процесі розробки елементів фазі-логіки типу "добуток" для побудови імпульсних елементів, які реалізують операції "І", "АБО", "СУМА".

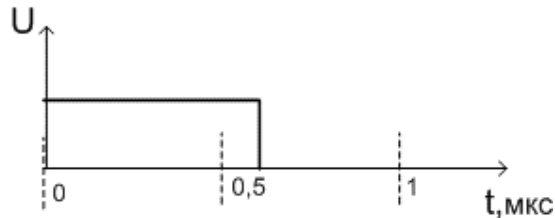
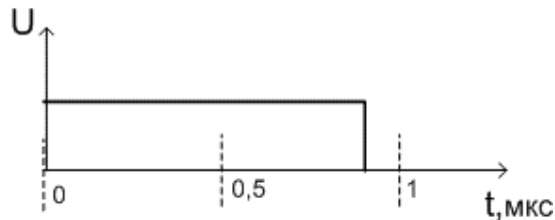
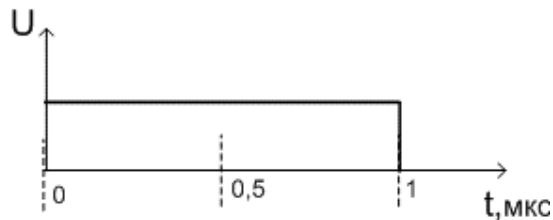
## Часові діаграми роботи елементів

Для прикладу покажемо часові діаграми роботи частотно-імпульсного елемента "І", широтно-імпульсного елемента "АБО", фазо-імпульсного елемента "СУМА" (рис. 1 – 3).

Рис. 1, а. Імпульс з частотою  $f_1^x$ Рис. 1, б. Імпульс з частотою  $f_2^x$

Рис. 1, в. Імпульс з частотою  $f_{AND}^y$ 

При реалізації операції “І” (1) на вхід елемента надходять імпульсні сигнали  $x_1, x_2$ , на виході з’являється імпульсний сигнал  $y_{AND}$ . У випадку частотно-імпульсного кодування сигнали  $x_1, x_2$ , мають частоти заповнення імпульсів  $f_1^x, f_2^x$ , а сигнал  $y_{AND} - f_{AND}^y$ . Часові діаграми для фазі-логічного елемента “І” наведені на рис. 1. Вхідні величини  $\mu_1^x$  і  $\mu_2^x$  приймають значення 0,3 і 0,4 відповідно. Тоді за формулою (1) –  $\mu_{AND}^y = 0,12$ . Згідно з розробленим методом частотно-імпульсного кодування:  $f_1^x = 2,2 \text{ МГц}$  (рис. 1, а.),  $f_2^x = 2,6 \text{ МГц}$  (рис. 1, б.), а  $f_{AND}^y = 1,48 \text{ МГц}$  (рис. 1, в.).

Рис. 2, а. Імпульс тривалістю  $t_1^x$ Рис. 2, б. Імпульс тривалістю  $t_2^x$ Рис. 2, в. Імпульс тривалістю  $t_{OR}^y$ 

При реалізації операції “АБО” (2) на вхід елемента надходять імпульсні сигнали  $x_1, x_2$ , на виході з’являється імпульсний сигнал  $y_{OR}$ . У випадку широтно-імпульсного кодування сигнали  $x_1, x_2$  мають тривалості імпульсів  $t_1^x, t_2^x$ , а сигнал  $y_{OR} - t_{OR}^y$ . Часові діаграми для фазі-логічного елемента “АБО” наведені на рис. 2. Вхідні величини  $\mu_1^x$  і  $\mu_2^x$  приймають значення 0,5 і 0,8 відповідно. Тоді за формулою (2) –  $\mu_{OR}^y = 0,9$ . Згідно з розробленим методом широтно-імпульсного кодування  $t_1^x = 0,6 \text{ мкс}$  (рис. 2, а.),  $t_2^x = 0,9 \text{ мкс}$  (рис. 2, б.), а

$t_{OR}^y = 1 \text{ мкс}$  (рис. 2, в.).

При реалізації операції “СУМА” (3) на вхід елемента надходять імпульсні сигнали  $x_1, x_2$ , на виході з’являється імпульсний сигнал  $y_{SUM}$ . У випадку фазо-імпульсного кодування сигнали  $x_1, x_2$  мають різниці фаз опорного і інформаційних імпульсів  $\varphi_1^x, \varphi_2^x$ , а сигнал  $y_{SUM} - \varphi_{SUM}^y$ . Часові діаграми для фазі-логічного елемента “СУМА” наведені на рис. 3. Вхідні величини  $\mu_1^x$  і  $\mu_2^x$  приймають значення 0,7 і 0,1 відповідно. Тоді за формулою (3).

$\mu_{SUM}^y = 0,66$ . Згідно з розробленим методом фазо-імпульсного кодування  $\varphi_1^x = \frac{7}{5}\pi$  (рис. 3,

а.),  $\varphi_2^x = \frac{\pi}{5}$  (рис. 3, б.), а  $\varphi_{SUM}^y = 1,22\pi$  (рис. 3, в.).

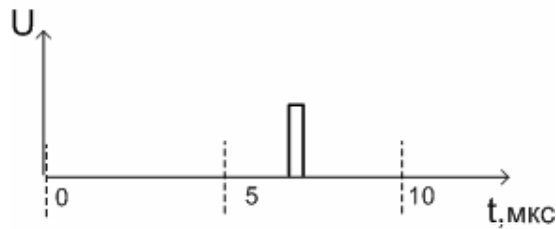


Рис. 3, а. Імпульс з фазою  $\varphi_1^x$

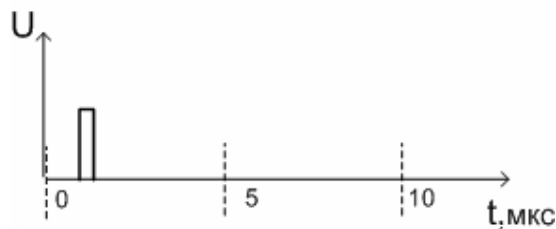


Рис. 3, б. Імпульс з фазою  $\varphi_2^x$

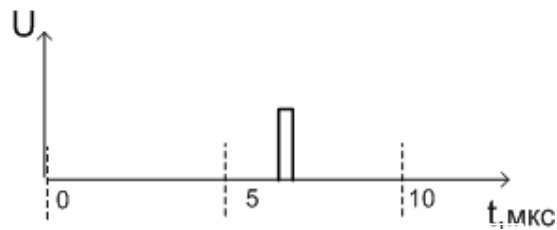


Рис. 3, в. Імпульс з фазою  $\varphi_{SUM}^y$

### Частотно-імпульсний елемент “Г”

За наведеними вище рівняннями роботи було розроблено частотно-імпульсний елемент, який здійснює фазі-логічну операцію “Г” (рис. 4).

Елемент функціонує таким чином. Сигнал  $x_1$  з частотою заповнення імпульсів  $f_{x1} = f_\alpha + \mu_1^x \cdot f_\gamma$  надходить на входи смугових фільтрів СФ1 – СФ11. фільтри налаштовані таким чином:

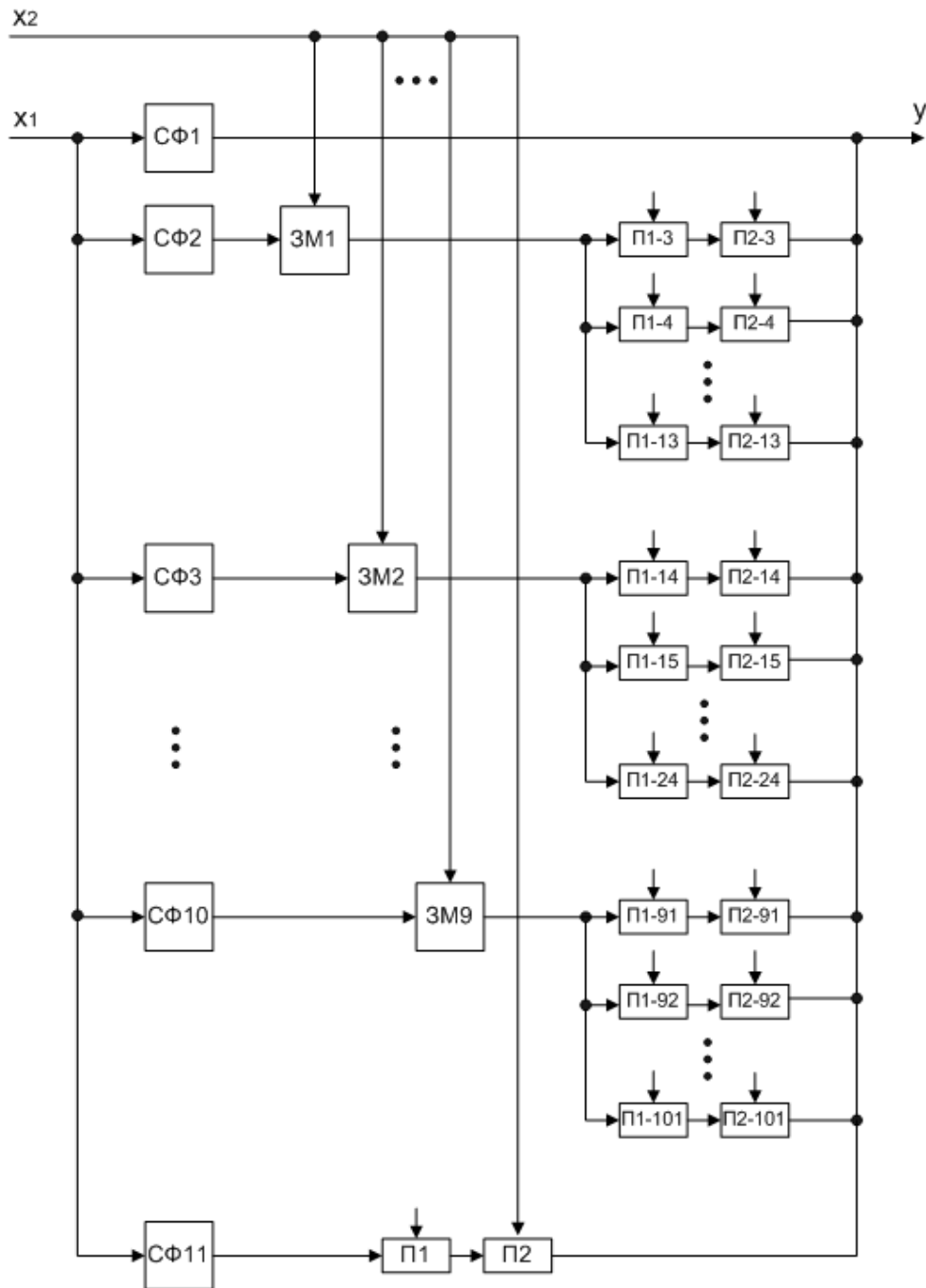


Рис. 4. Структурна схема пристрою "Г"

фільтр  $СФ1$  пропускає лише сигнал з частотою заповнення імпульсів  $f_\alpha$ ;

$СФ2$  – сигнал з частотою заповнення імпульсів  $(f_\alpha + 0,1 \cdot f_\gamma)$ ;

$СФ3$  – сигнал з частотою заповнення імпульсів  $(f_\alpha + 0,2 \cdot f_\gamma)$ ;

$СФ4$  – сигнал з частотою заповнення імпульсів  $(f_\alpha + 0,3 \cdot f_\gamma)$ ;

$СФ5$  – сигнал з частотою заповнення імпульсів  $(f_\alpha + 0,4 \cdot f_\gamma)$ ;

$СФ6$  – сигнал з частотою заповнення імпульсів  $(f_\alpha + 0,5 \cdot f_\gamma)$ ;

$СФ7$  – сигнал з частотою заповнення імпульсів  $(f_\alpha + 0,6 \cdot f_\gamma)$ ;

$СФ8$  – сигнал з частотою заповнення імпульсів  $(f_\alpha + 0,7 \cdot f_\gamma)$ ;

СФ9 – сигнал з частотою заповнення імпульсів  $(f_{\alpha} + 0,8 \cdot f_{\gamma})$ ;

СФ10 – сигнал з частотою заповнення імпульсів  $(f_{\alpha} + 0,9 \cdot f_{\gamma})$ ;

СФ11 – сигнал з частотою заповнення імпульсів  $f_{\beta}$ .

Якщо частота першого вхідного сигналу  $f_{x1} = f_{\alpha}$ , що відповідає фазі-логічному нулю, тоді з виходу фільтра СФ1 сигнал без будь-яких перетворень надходить на вихід пристрою  $Y$ .

Якщо частота першого вхідного сигналу  $f_{x1} = f_{\beta}$ , що відповідає фазі-логічній одиниці, тоді сигнал проходить через фільтр СФ11 і поступає на керуючий вхід перемикача П1, на інформаційний вхід якого надходить сигнал з частотою  $f_c$ , яка є керуючою для перемикача П2, на інформаційний вхід якого надходить другий вхідний сигнал з частотою  $f_{x2}$ . Так як під дією частоти  $f_{\beta}$  перемикач П1 закривається, то на його виході частота  $f_c$  буде відсутня, тоді перемикач П2 залишається відкритим, і на його виході з'являється частота другого вхідного сигналу  $f_{x2}$ , яка надходить на вихід пристрою.

Якщо  $f_{x1} \neq f_{\alpha}$  і  $f_{x1} \neq f_{\beta}$ , тоді сигнал з'являється на виході одного з фільтрів СФ2 – СФ10, в залежності від значення частоти  $f_{x1}$ .

Другий вхідний сигнал частотою  $f_{x2}$  поступає на перші входи змішувачів частот ЗМ1 – ЗМ9. На другий вхід одного зі змішувачів ЗМ1 – ЗМ9 надходить перший вхідний сигнал з виходу одного з фільтрів СФ2 – СФ10 відповідно.

З виходу змішувача отримуємо сигнал з проміжною частотою  $f_{x1} + f_{x2}$ . Сигнал з виходу змішувача надходить на входи відповідних перемикачів, керуючі сигнали яких наведені у табл. 3, а інформаційною частотою для перемикачів П1-3 – П1-101 є частота  $f_c$ , яка є керуючою для перемикачів П2-3 – П2-101, інформаційні частоти яких наведені у табл. 3. Входи перемикачів П2-3 – П2-101 з'єднані з відповідними виходами перемикачів П1-3 – П1-101. Таким чином, сигнал з'являється на виході одного зі змішувачів, надходить на виходи відповідних йому одинадцяти перемикачів, для одного з них він є керуючим і закриває його, тоді сигнали з'являються на виході інших десяти перемикачів і закривають наступні десять перемикачів, на виходах яких сигнал буде відсутній. Той перемикач, на вході якого керуючий сигнал був відсутній, залишиться відкритим, і його інформаційний сигнал надійде на вихід пристрою "Г".

Таблиця 3

Керуючі сигнали перемикачів П1-3 – П1-101 та інформаційні сигнали перемикачів П2-3 – П2-101

ЗМ1			
перемикач	$f_{\text{кер}}$	перемикач	$f_{\text{інф}}$
П1-3	$2f_{\alpha} + 0,1 \cdot f_{\gamma}$	П2-3	$f_{\alpha}$
П1-4	$2f_{\alpha} + 0,2 \cdot f_{\gamma}$	П2-4	$f_{\alpha} + 0,01 \cdot f_{\gamma}$
П1-5	$2f_{\alpha} + 0,3 \cdot f_{\gamma}$	П2-5	$f_{\alpha} + 0,02 \cdot f_{\gamma}$
П1-6	$2f_{\alpha} + 0,4 \cdot f_{\gamma}$	П2-6	$f_{\alpha} + 0,03 \cdot f_{\gamma}$
П1-7	$2f_{\alpha} + 0,5 \cdot f_{\gamma}$	П2-7	$f_{\alpha} + 0,04 \cdot f_{\gamma}$
П1-8	$2f_{\alpha} + 0,6 \cdot f_{\gamma}$	П2-8	$f_{\alpha} + 0,05 \cdot f_{\gamma}$
П1-9	$2f_{\alpha} + 0,7 \cdot f_{\gamma}$	П2-9	$f_{\alpha} + 0,06 \cdot f_{\gamma}$
П1-10	$2f_{\alpha} + 0,8 \cdot f_{\gamma}$	П2-10	$f_{\alpha} + 0,07 \cdot f_{\gamma}$
П1-11	$2f_{\alpha} + 0,9 \cdot f_{\gamma}$	П2-11	$f_{\alpha} + 0,08 \cdot f_{\gamma}$

П1-12	$2f_{\alpha} + f_{\gamma}$	П2-12	$f_{\alpha} + 0,09 \cdot f_{\gamma}$
П1-13	$2f_{\alpha} + 1,1 \cdot f_{\gamma}$	П2-13	$f_{\alpha} + 0,1 \cdot f_{\gamma}$
ЗМ2			
перемикач	$f_{\text{кер}}$	перемикач	$f_{\text{інф}}$
П1-14	$2f_{\alpha} + 0,2 \cdot f_{\gamma}$	П2-14	$f_{\alpha}$
П1-15	$2f_{\alpha} + 0,3 \cdot f_{\gamma}$	П2-15	$f_{\alpha} + 0,02 \cdot f_{\gamma}$
П1-16	$2f_{\alpha} + 0,4 \cdot f_{\gamma}$	П2-16	$f_{\alpha} + 0,04 \cdot f_{\gamma}$
П1-17	$2f_{\alpha} + 0,5 \cdot f_{\gamma}$	П2-17	$f_{\alpha} + 0,06 \cdot f_{\gamma}$
П1-18	$2f_{\alpha} + 0,6 \cdot f_{\gamma}$	П2-18	$f_{\alpha} + 0,08 \cdot f_{\gamma}$
П1-19	$2f_{\alpha} + 0,7 \cdot f_{\gamma}$	П2-19	$f_{\alpha} + 0,1 \cdot f_{\gamma}$
П1-20	$2f_{\alpha} + 0,8 \cdot f_{\gamma}$	П2-20	$f_{\alpha} + 0,12 \cdot f_{\gamma}$
П1-21	$2f_{\alpha} + 0,9 \cdot f_{\gamma}$	П2-21	$f_{\alpha} + 0,14 \cdot f_{\gamma}$
П1-22	$2f_{\alpha} + f_{\gamma}$	П2-22	$f_{\alpha} + 0,16 \cdot f_{\gamma}$
П1-23	$2f_{\alpha} + 1,1 \cdot f_{\gamma}$	П2-23	$f_{\alpha} + 0,18 \cdot f_{\gamma}$
П1-24	$2f_{\alpha} + 1,2 \cdot f_{\gamma}$	П2-24	$f_{\alpha} + 0,2 \cdot f_{\gamma}$

### Висновки

Таким чином, до операцій фазі-логіки типу "добуток" належать такі операції: "І", "АБО", "СУМА". Для елементів, які реалізують вказані операції, наведено рівняння роботи. Роботу елементів показано за допомогою часових діаграм. Розроблено структурну схему частотно-імпульсного елемента "І". Представлені рівняння роботи пропонується використовувати у процесі розробки частотно-, широтно та фазо-імпульсних елементів фазі-логіки, які реалізують операції типу "добуток": "І", "АБО", "СУМА".

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Robert Fuller. Fuzzy logic and neural nets in intelligent systems // Information Systems Day. – Turku Centre for Computer Science, Abo, 1999. – Vol. 17. – P. 74 – 94.
2. Reyneri L. M. Unification of neural and wavelet networks and fuzzy systems // IEEE Trans. on Neural Networks. – 1998.
3. Ota Y., Wilamowski B. M. CMOS Implementation of a Voltage-Mode Fuzzy Min-Max Controller // Journal of Circuits, Systems and Computers. – 1996. – Vol. 6, № 2. – P. 171 – 184.
4. Ota Y., Wilamowski B. M. Current-Mode CMOS Implementation of a Fuzzy Min-Max Network // World Congress of Neural Networks. – Washington DC (USA). – 1995. – Vol. 2. – P. 480 – 483.
5. Angel Rodriguez-Vazquez, Rafael Navas-Gonzalez, Manuel Delgado-Restituto M., Fernando Vidal-Verdu. A modular programmable CMOS analog fuzzy controller chip // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – 1999. – Vol. 46, №3. – P. 251 – 265.

**Семенова Олена Олександрівна** – к. т. н., старший викладач кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, e-mail: Helene\_S@ukr.net.

**Семенов Андрій Олександрович** – к. т. н., старший викладач кафедри радіотехніки, e-mail: Semenov79@ukr.net.

**Задорожний Віталій Костянтинович** – к. т. н., доцент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення.

**Войцеховська Ольга Олександрівна** – здобувач, інженер кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, тел. 598-064, e-mail: olga1085@rambler.ru.

Вінницький національний технічний університет.